



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROJETO EM ENGENHARIA ELÉTRICA:
DESENVOLVIMENTO DE UMA CHAVE SÍNCRONA PARA CHAVEAMENTO
CONTROLADO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

ALUNO: Leandro de Luna Araújo

MATRÍCULA: 20411234

ORIENTADOR: Prof. Francisco das Chagas F. Guerra

CAMPINA GRANDE, MAIO DE 2009

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, por todo o incentivo que me foi dado, seja financeiro ou psicológico, por toda força, atenção e carinho dedicados durante todos os anos de minha vida e que culminaram na realização de mais um sonho pessoal e formação profissional.

Em segundo lugar, agradeço a todos os professores e colegas do departamento que, cada um de sua forma, me mostraram caminhos para obtenção do sucesso, seja pelo tempo despendido em seus ensinamentos ou pelas provas (cada vez mais) difíceis.

Gostaria de agradecer a TODOS os meus amigos, que tornaram estes últimos 5 anos de estadia na universidade (e 23 anos de estadia neste mundo) um pouco menos difícil, diria até suportável. Devo muito a todos vocês.

Agradecimento especial a Ricardo Chinarro, por ter emprestado por tantas vezes o gravador de PIC e por todo apoio técnico na programação. Sem eles (Ricardo e seu gravador) não teria sido possível a obtenção dos resultados aqui apresentados e no tempo considerado.

Um último agradecimento ao professor Chagas, pelo convite à participação do trabalho e por todo o apoio dado. Também por todos os conselhos dados dentro e fora da sala de aula.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	4
1.1 Considerações Gerais.....	4
1.2 Energização de um Transformador Monofásico.....	5
1.3 Comportamento em Regime Saturado.....	7
2. CHAVE SÍNCRONA MICROCONTROLADA (CSuC) MONOFÁSICA.....	8
2.1 Considerações Gerais.....	8
2.2 Circuito Elétrico.....	8
3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	16
4. CONCLUSÃO.....	25
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26
ANEXO	27

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Os transformadores utilizados nos sistemas elétricos de potência requerem, em regime permanente, correntes de excitação da ordem de 0,5 a 2% da corrente nominal. Entretanto, durante o processo de energização, podem ocorrer surtos de corrente cujas características são as seguintes:

- Valor de pico inicial que nas condições mais severas pode superar vinte vezes o valor de pico da corrente nominal;
- Duração de vários ciclos;
- Amplo espectro harmônico que inclui componentes de ordem par, com predominância da segunda harmônica.

Este efeito é conhecido como corrente de *inrush*, cujos principais efeitos são:

- Atuação indevida de fusíveis e relés de proteção de atuação rápida (sobrecorrente, instantâneos e diferenciais);
- Afundamentos temporários de tensão, diminuindo a qualidade da energia;
- Redução de vida útil de transformadores e outros componentes, devido às solicitações de natureza eletromecânica e térmica;
- Sobretensões causadas por fenômenos de ressonância harmônica em sistemas que contém filtros elétricos, como no caso linhas de alta tensão que operam em CC.

Para evitar que relés de proteção de operação rápida atuem de modo indevido durante a energização de transformadores, os relés diferenciais utilizam um critério capaz de distinguir uma corrente de *inrush* de uma corrente de curto-circuito.

A intensidade e duração das correntes de *inrush* dependem de fatores diversos:

- Valor instantâneo da tensão aplicada ao transformador no instante da energização;
- Magnitude e sinal do fluxo residual no núcleo magnético;
- Resistência e indutância equivalentes em série do circuito alimentador;
- Resistência e indutância de dispersão do enrolamento primário do transformador;
- Características magnéticas e geometria do núcleo do transformador;
- Impedância da carga ligada ao secundário.

A mitigação dos efeitos da corrente de *inrush* em transformadores, então, pode ser feita pelo controle do ângulo de chaveamento do equipamento. A chave síncrona é uma alternativa na diminuição destes picos de corrente transitória.

1.2 Energização de um Transformador Monofásico

O comportamento da corrente durante a energização de transformadores pode ser matematicamente analisado a partir do circuito RL mostrado na Fig. 1. O indutor não linear existente possui característica de magnetização dada pela seguinte equação:

$$i = f(\lambda) \quad (1)$$

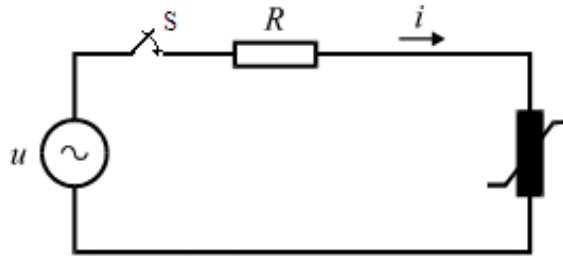


Fig. 1. Circuito equivalente de transformador com secundário em vazio.

Após o fechamento da chave em $t = 0$, a equação que representa o comportamento do circuito, desprezando a queda de tensão na chave, é

$$\frac{d\lambda}{dt} + Ri = U_m \text{sen}(wt). \quad (2)$$

Considerando que o núcleo magnético não atinge a saturação, é razoável supor que a característica $\lambda - i$ é linear até o ponto de joelho da curva de magnetização. Isto permite reescrever (1) da forma como apresentada por (3), na qual L_m é a indutância de magnetização do transformador, que corresponde matematicamente à inclinação da reta que passa pela origem e pelo ponto de joelho da curva de saturação.

$$i = f(\lambda) = \frac{\lambda}{L_m} \quad (3)$$

Assim, (2) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{d\lambda}{dt} + R \frac{\lambda}{L_m} = U_m \text{sen}(wt). \quad (4)$$

Supondo que $\lambda(0) = 0$ e $R \ll \omega L_m$, a solução de (4) é dada por (Guerra, 2005):

$$\lambda(t) = \lambda_m \left[e^{-\frac{R}{L_m}t} - \cos \omega t \right] \quad (5)$$

A equação (5) é composta por um termo com decaimento exponencial, relacionado ao comportamento transitório do fluxo nos instantes de aplicação da tensão senoidal e por um termo senoidal relacionado ao regime permanente. Na Fig. 2 é possível visualizar o comportamento de λ em $t > 0$. Observa-se o estabelecimento de um sobrefluxo no núcleo magnético.

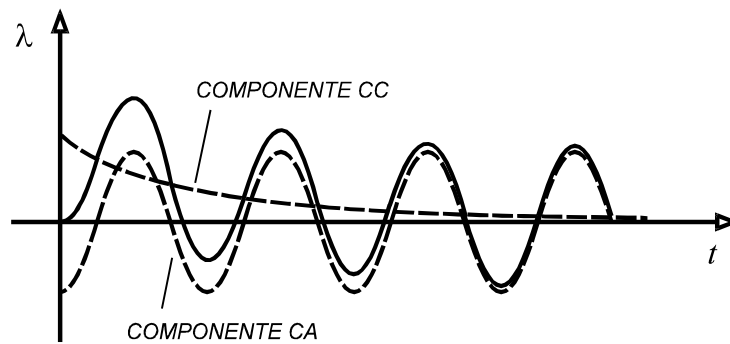


Fig. 2. Fluxo de enlace *versus* tempo após a energização do transformador.

Conforme já mencionado, um dos fatores de grande importância no grau de assimetria da onda de fluxo é o valor da tensão da fonte no instante da energização do transformador. Até este ponto, foi considerado que este valor é nulo, o que consiste em uma situação particular. Uma análise rápida pode ser feita fazendo $R = 0$ no circuito da Fig.1. Assim, (2) é escrita como:

$$\frac{d\lambda}{dt} = U_m \text{sen}(\omega t + \theta). \quad (6)$$

Assumindo $\lambda(0) = \lambda_R$ e $\lambda_m = U_m/\omega$, a solução de (6) é (Guerra, 2005):

$$\lambda = \lambda_R + \lambda_m [\cos \theta - \cos(\omega t + \theta)]. \quad (7)$$

A análise de (7) permite afirmar que a onda de fluxo imposta ao núcleo apresenta valor máximo quando $\omega t = k\pi$ ($k = 1, 2, 3, \dots$) e $\theta = 0$. Analogamente, não ocorre assimetria da forma de onda de λ para $\lambda_R = 0$ e $\theta = \pi/2$, ou seja, no momento em que a tensão da fonte atinge seu máximo. Esta é a condição mais favorável para energização, já que é evitado sobrefluxo no transformador, o qual poderia levar o núcleo à saturação.

1.3 Comportamento em Regime Saturado

Os elevados valores de fluxo em regime transitório atingem a região de saturação do laço de histerese do núcleo magnético. Desta forma, em regime saturado, pequenas variações de λ ocasionam variações muito elevadas da corrente elétrica i , de modo a se estabelecer surtos de corrente transitórios: o *inrush*. Uma melhor visualização do que foi dito pode ser visualizado na Fig. 3.

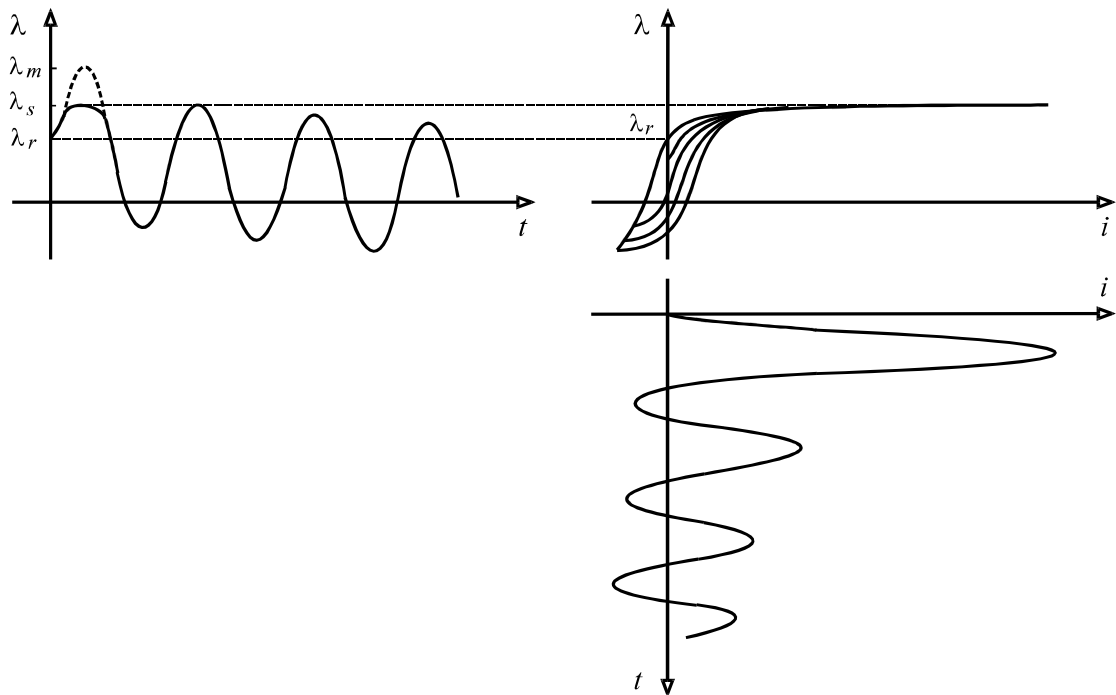


Fig. 3. Representações gráficas do fluxo de enlace, ciclo de histerese e corrente de *inrush*.

A fim de avaliar a influência do fluxo residual λ_r nos valores da corrente de *inrush*, é necessário considerar o núcleo com histerese, conforme pode ser visualizado na Fig. 3. Sendo λ limitado pelo nível de saturação λ_s , o valor λ_m não é alcançado. Entretanto, o efeito do fluxo transitório ocasiona picos enormes de corrente. Observa-se também que, se o fluxo residual no núcleo apresentar mesmo sinal do fluxo imposto pela fonte, a região de saturação pode ser atingida mais rapidamente e com mais intensidade, resultando em maior assimetria da onda de fluxo e em valores de pico de corrente de *inrush* mais elevados. Por outro lado, se os citados fluxos têm sinais contrários, a corrente de *inrush* será atenuada.

2.2.2 Circuito de Sincronização

O circuito de sincronização é responsável pela geração de um sinal lógico em sincroniza com a onda de tensão da rede. Este sinal lógico serve de entrada para o microcontrolador do circuito de controle e permite o conhecimento por parte deste dispositivo do instante de passagem por zero do sinal que alimenta o transformador de potência. Este circuito pode ser visualizado na Fig. 5.

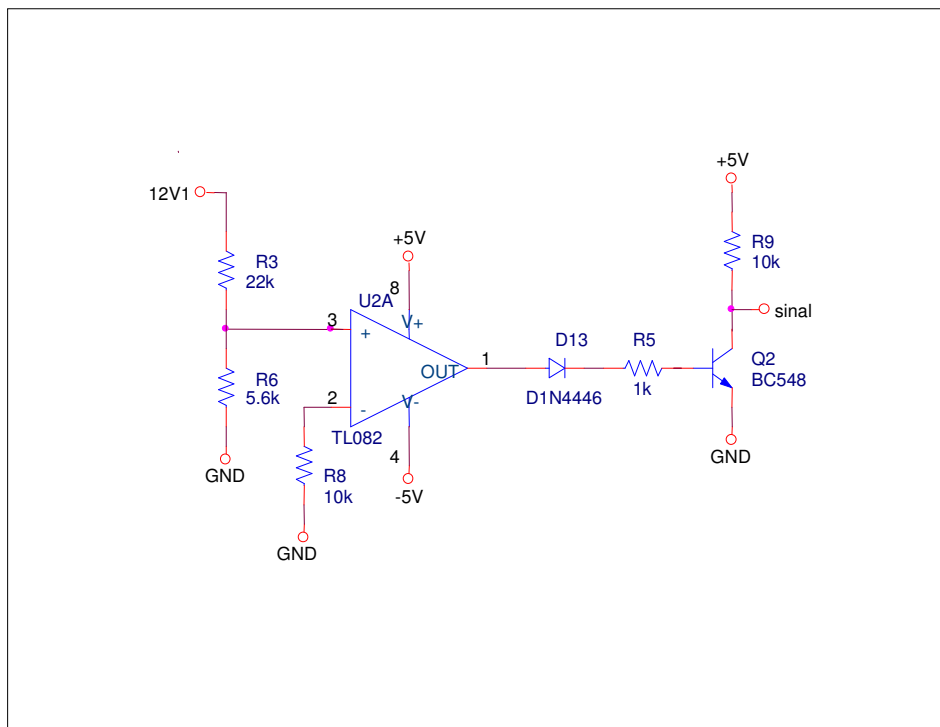


Fig. 5. Diagrama esquemático do circuito de sincronização da CSuC.

O nó 12V1 mostrado na Fig. 5 é proveniente do transformador de isolamento $\pm 18V/500$ mA e serve como sinal de referência no circuito de sincronização. A saída deste circuito (nó *signal*) pode ser visualizada na Fig. 6.

Um ponto importante que deve ser citado é: dependendo da polaridade com a qual o transformador é ligado à rede de alimentação 220V/60Hz, o sinal de onda quadrada pode inverter-se em relação àquele visualizado na Fig. 6, gerando resultados incorretos, já que a sincronia com a tensão da rede foi perdida. É necessária, então, a visualização das formas

de onda como estão esquematizadas na figura antes da realização de qualquer teste para verificar que não existe a inversão.

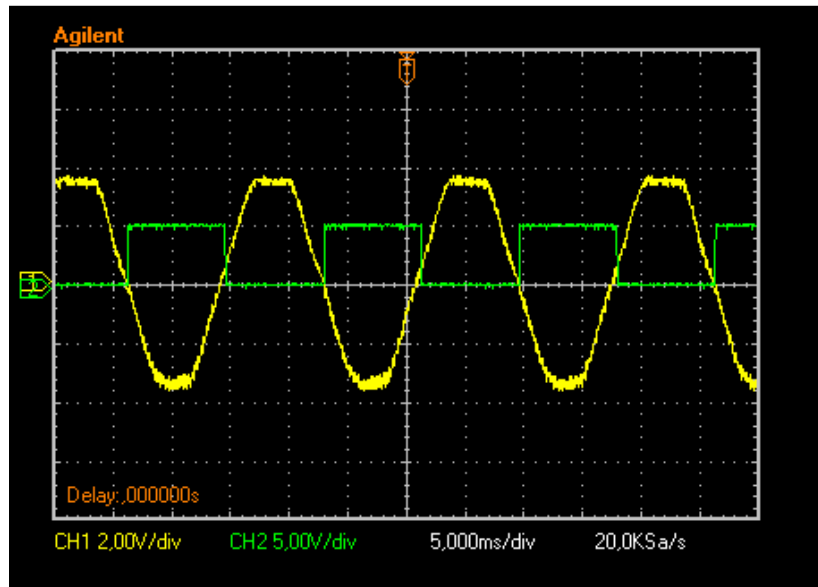


Fig. 6. Forma de onda do sinal de saída (CH2) do circuito de sincronia.

2.2.3 Circuito de Controle

É no circuito de controle que se encontra o código escrito para a chave síncrona projetada. Este circuito recebe como entrada o sinal sincronizado com a forma de onda da tensão da rede e gera o sinal de disparo no instante de tempo adequado. Este circuito comunica-se diretamente com o usuário por meio de portas de entrada (teclado numérico 4x3) e de saída (*display* LCD 16x2). Há também um contato do tipo NA que funciona como botão de *reset* do circuito de controle. O esquema elétrico do circuito de controle pode ser visualizado nas Fig. 7 e Fig. 8.

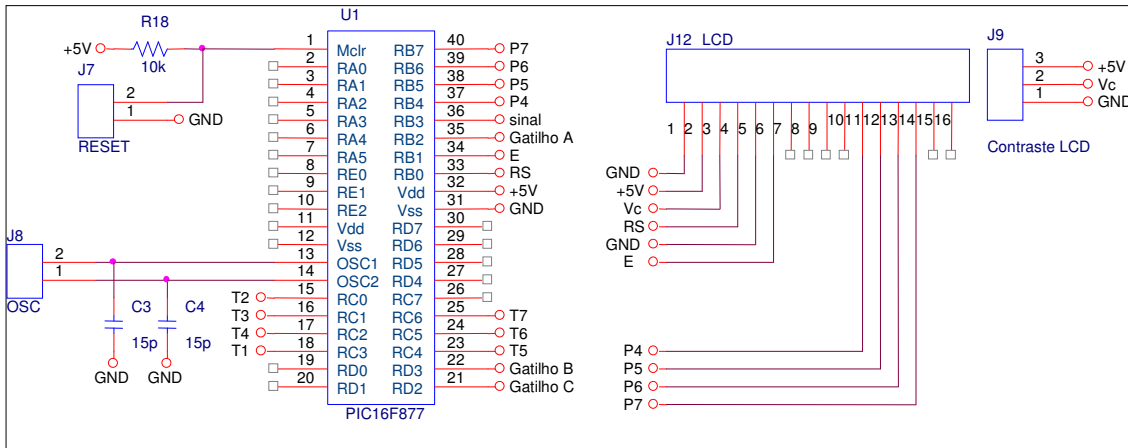


Fig. 7. Diagrama esquemático do circuito de controle da CSuC.

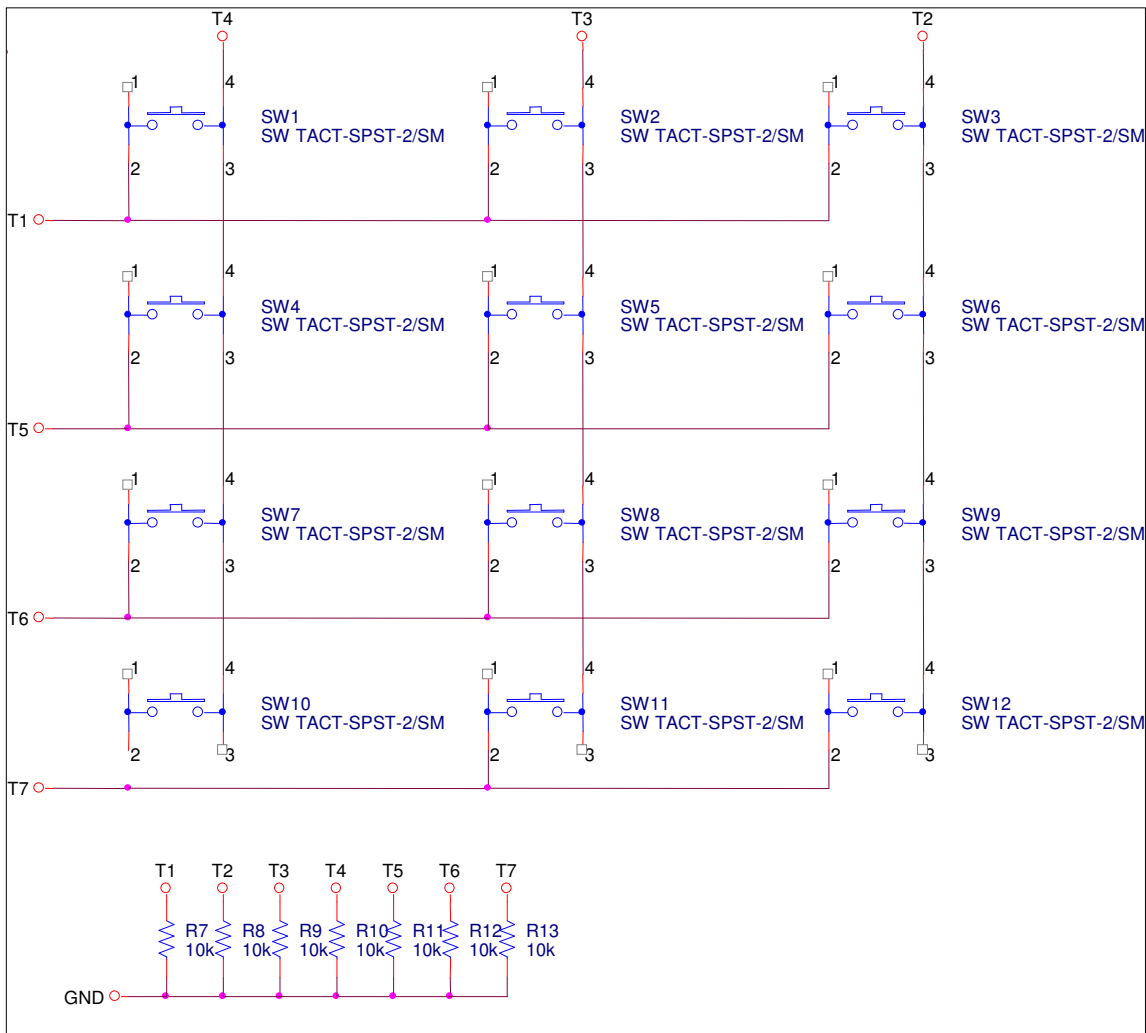


Fig. 8. Diagrama esquemático do teclado numérico matricial da CSuC

No circuito da Fig. 7 já se encontram disponibilizadas as saídas para os sinais de disparo das fases B e C do circuito trifásico.

2.2.4 Circuito de Acionamento do Relé

A primeira modificação significativa neste projeto em relação ao apresentado por Leite (2007) consiste na substituição do *TRIAC* pelo relé no circuito de potência. Esta modificação possibilita maior analogia com os disjuntores existentes nos sistemas elétricos reais, destinados a abertura e fechamento do circuito em condições de carga e de defeito. Sendo assim, foram necessárias algumas modificações no programa fonte, já que o atraso do relé não garante o sincronismo desejado.

O circuito de acionamento é responsável pela energização da bobina do relé para abertura ou fechamento de seus contatos. Este pode ser visualizado na Fig. 9.

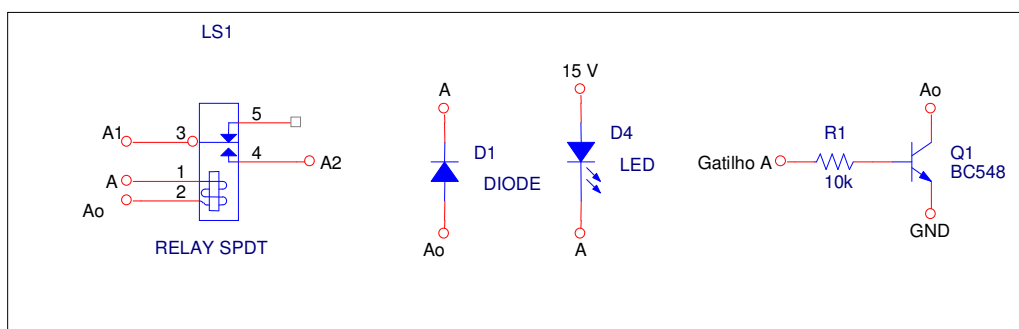


Fig. 9. Diagrama esquemático do circuito de acionamento do relé.

No circuito da Fig. 9, o transistor Q1 funciona como uma chave controlada pelo sinal de disparo proveniente da lógica do microcontrolador, energizando ou desenergizando a bobina do relé. Em antiparalelo à bobina do relé utilizado, é necessária a inclusão de um diodo de circulação.

2.2.5 Circuito de Potência

O circuito de potência foi montado em uma placa de madeira com bornes metálicos conectados entre si de forma adequada. O esquema deste circuito pode ser visualizado na Fig. 10. Os nós A e GND mostrados nesta figura são os mesmos que aqueles mostrados na Fig. 9 (circuito de acionamento do relé).

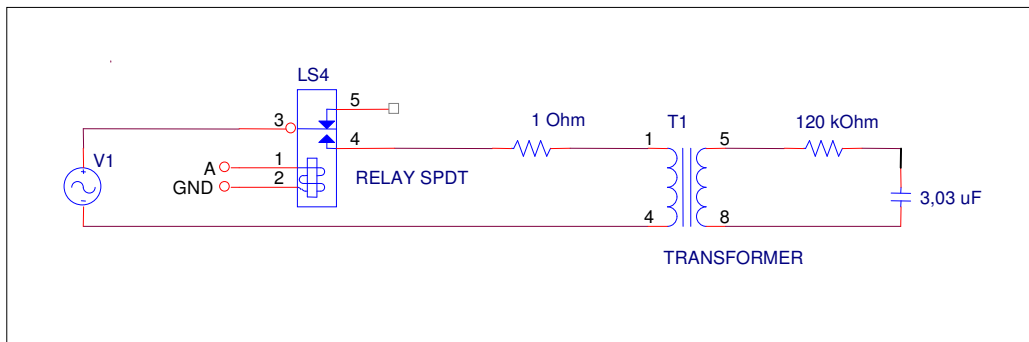


Fig. 10. Diagrama esquemático do circuito de potência

O resistor de 1Ω mostrado no diagrama tem a finalidade de realizar medições de corrente no circuito. Assim, pode-se visualizar a forma de onda da corrente medindo-se a tensão nos terminais deste resistor através de um osciloscópio.

O circuito RC do secundário do transformador é utilizado para medições de fluxo. A tensão no capacitor de $3,03 \mu\text{F}$, proveniente de uma associação de capacitores, é uma amostra do fluxo no núcleo do transformador. Dada a alta impedância do circuito do secundário na frequência de 60 Hz , o transformador comporta-se como se estivesse com estes terminais em aberto.

Como fonte de alimentação deste circuito (V1) foi utilizado um *VARIAC* trifásico disponível no laboratório.

2.2.6 Compensação do atraso do relé

Como mencionado, a garantia do funcionamento adequado da chave passa pelo problema da compensação no atraso do fechamento dos contatos do relé, atraso este que pode ser visualizado na Fig. 11 e cujos níveis de tensão foram mantidos baixos para garantir a proteção do circuito de controle, devido ao acoplamento dos pontos de terra dos dois circuitos (controle e potência) para fins de medição. Este teste simples possibilita o conhecimento do atraso de compensação, que deve ser fornecido ao programa e que garante o funcionamento adequado da chave aqui projetada.

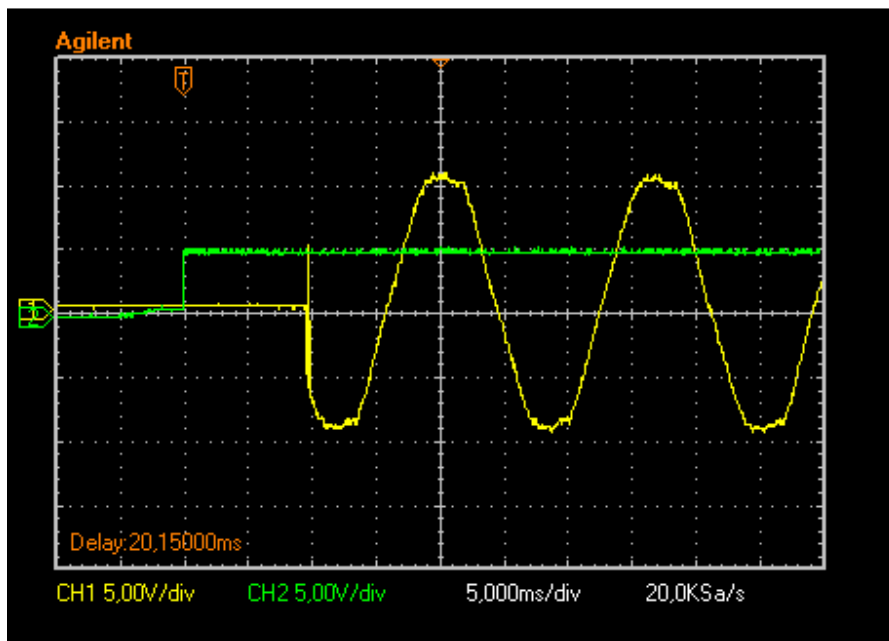


Fig.11. Sinal de controle (CH2) e tensão na carga (CH1)

Observa-se na Fig. 11 o momento exato em que o sinal de controle envia o comando para fechamento dos contatos do relé (borda de subida do sinal visualizado no CH2) e o momento em que a tensão nos terminais do transformador (sinal visualizado no CH1) é a tensão da fonte. Observa-se claramente o atraso mencionado.

A medição do valor de atraso pode ser feita visualmente ou através do uso de cursores de tempo, ferramenta disponível no osciloscópio utilizado e que diminui os erros provindos da leitura visual que venha a ser feita. A diferença temporal entre o instante de subida da borda (CH2) e o fechamento dos contatos do relé (atraso de fechamento), neste caso, é igual a 9,6 ms.

O programa foi modificado para atrasar a subida do sinal de disparo de um tempo igual ao complemento do atraso medido. No caso considerado, sendo o tempo medido igual a 9,6 ms, o atraso no sinal de controle é igual à quantidade de tempo necessária para completar um ciclo na frequência considerada:, ou seja, 7,07 ms.

O fator de compensação a ser lido pelo programa é igual ao valor, em graus, deste atraso de tempo calculado. De forma geral, atraso de compensação, A, é dado por:

$$A = \frac{\Delta t \times 360}{16,67}, \quad (8)$$

onde Δt é o valor, em ms, do complemento do atraso de fechamento dos contatos do relé.

Por motivos práticos, o valor de A na equação (8) deve ser um valor inteiro. Desta forma, aproximações devem ser feitas em algumas situações. O valor de A utilizado nos testes aqui realizados é igual a 153°.

Pensou-se em automatizar a chave de forma a não ser necessário digitar o valor de atraso necessário. Entretanto isto não foi implementado neste trabalho.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As formas de onda das tensões no transformador, para diferentes ângulos de gatilho, são mostradas na Fig. 12 à Fig. 19.

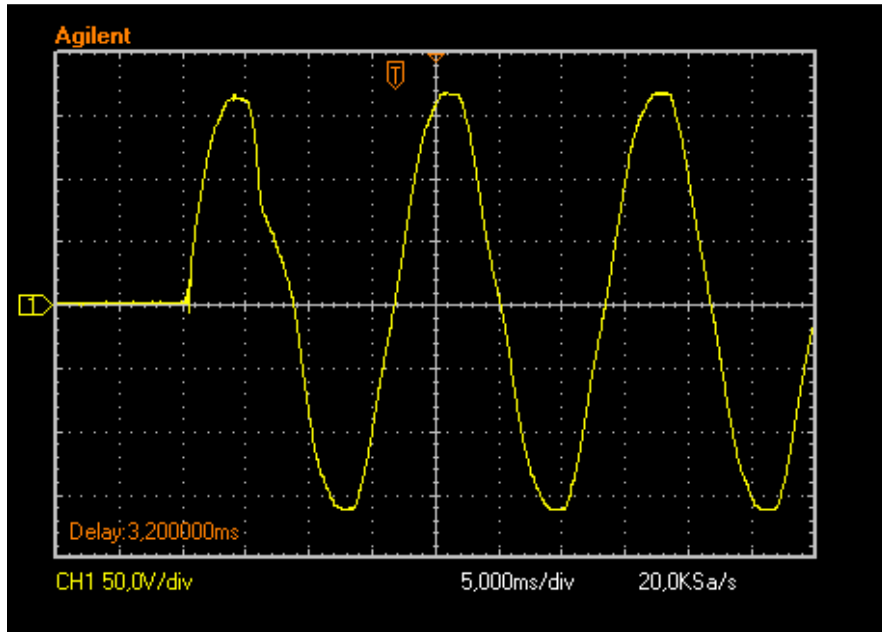


Fig. 12. Ângulo de gatilho: 0°.

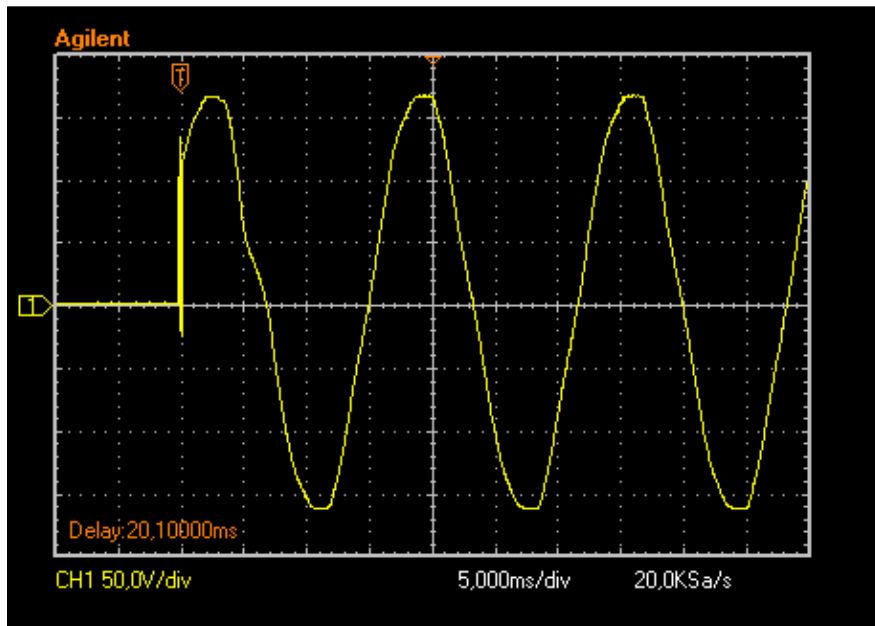


Fig. 13. Ângulo de gatilho: 30°.

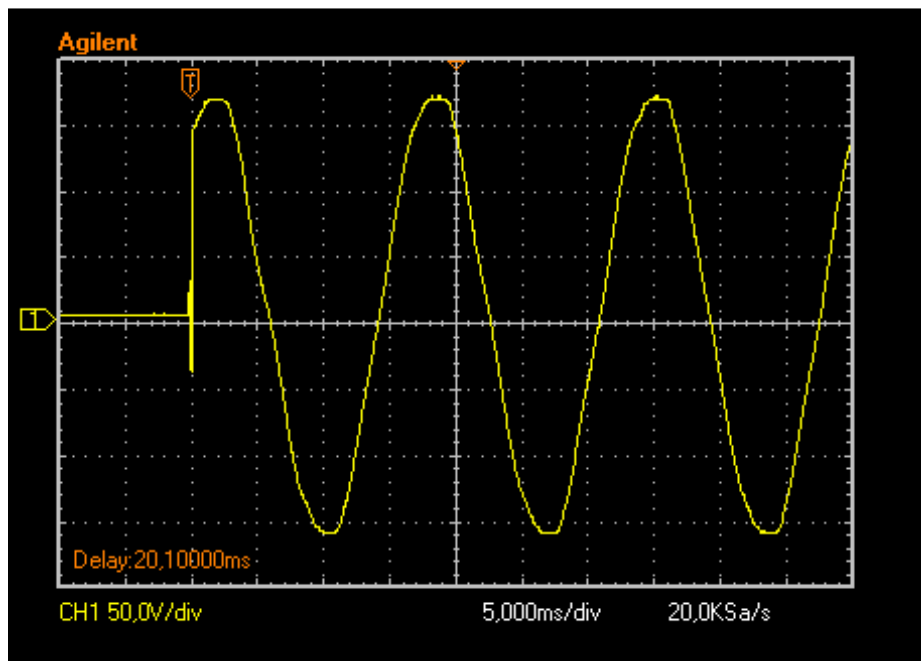


Fig. 14. Ângulo de gatilho: 45°.

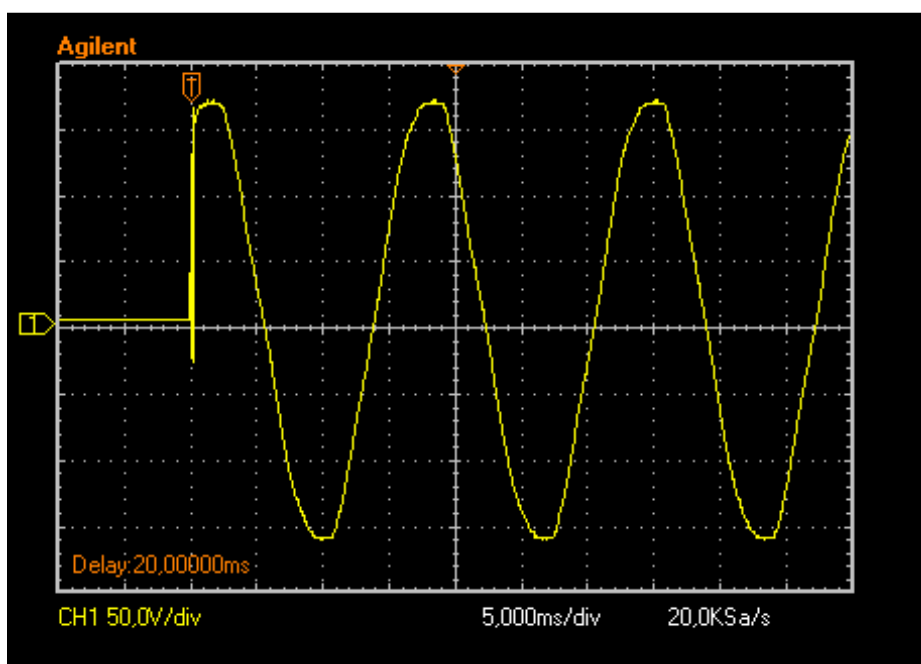


Fig. 15. Ângulo de gatilho: 60°.

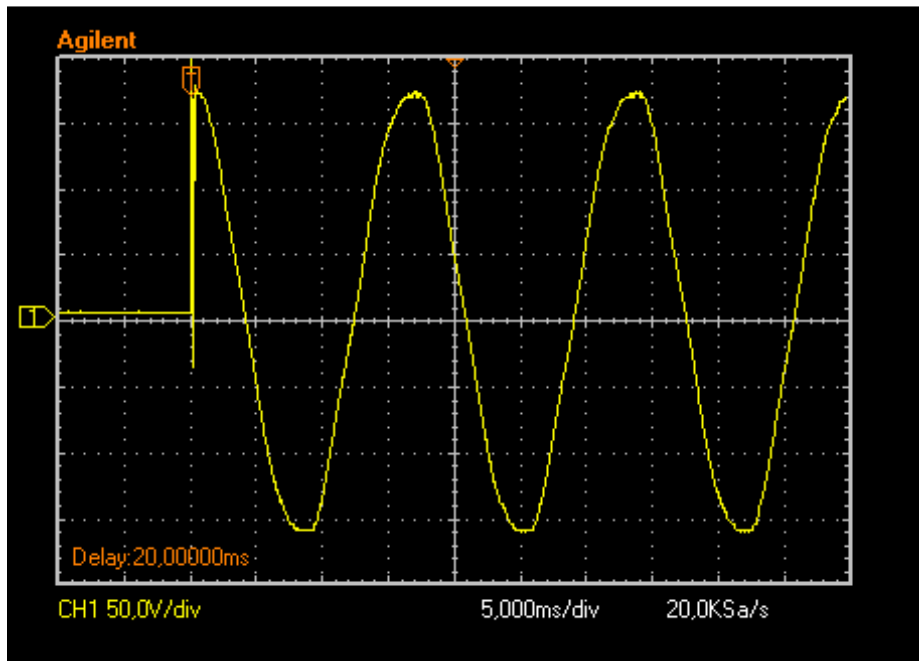


Fig. 16. Ângulo de gatilho: 90°.

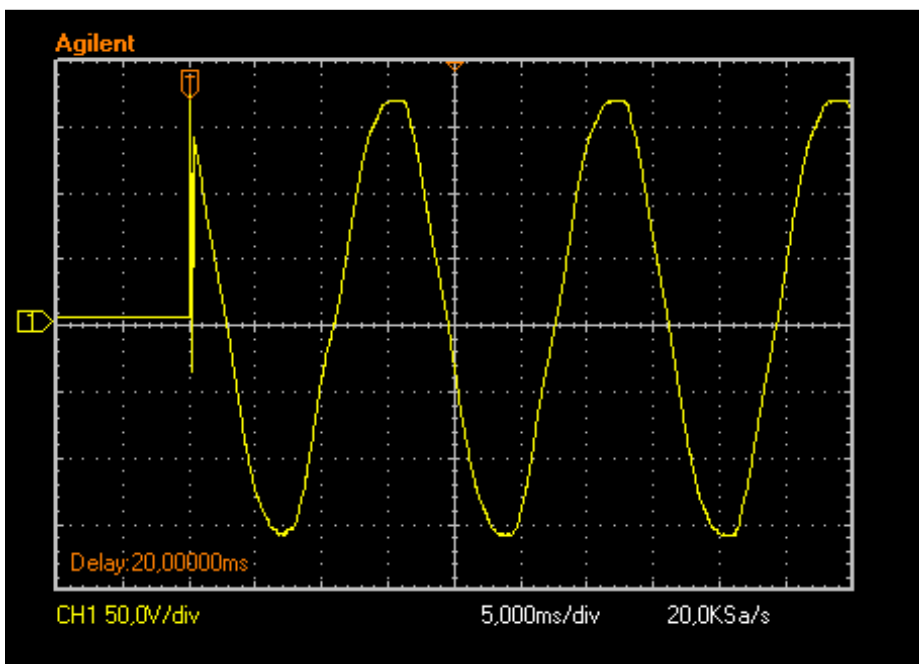


Fig. 17. Ângulo de gatilho: 120°.

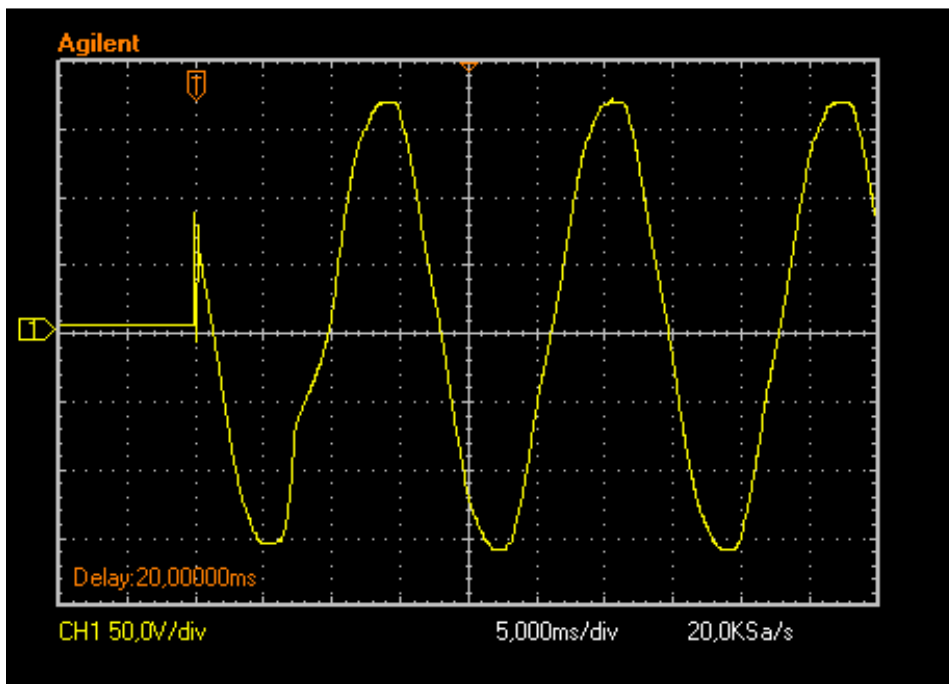


Fig. 18. Ângulo de gatilho: 150°.

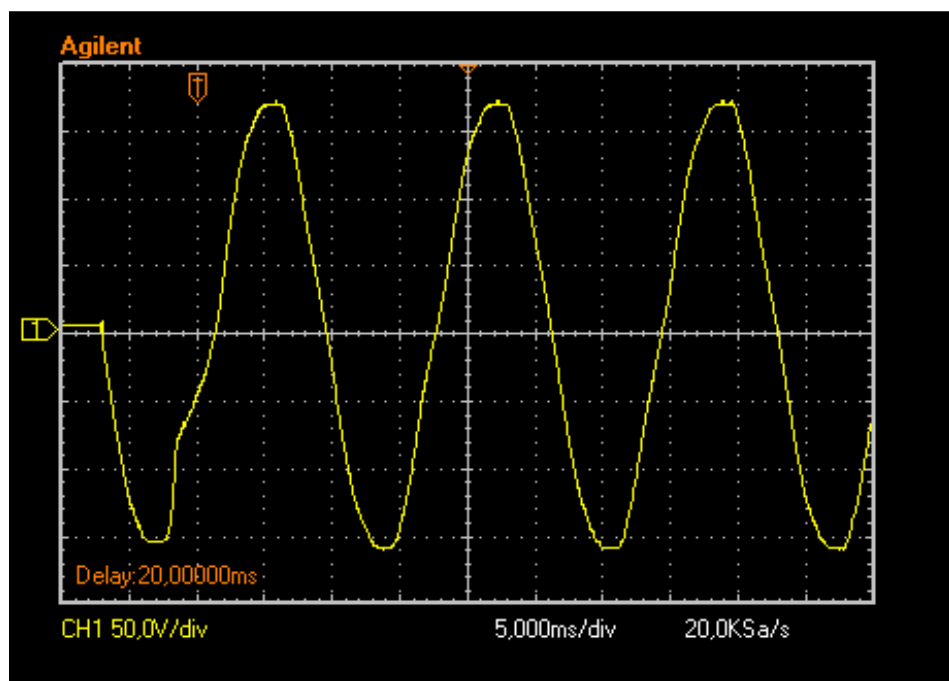


Fig. 19. Ângulo de gatilho: 180°.

Observa-se, mais claramente em algumas formas de onda do que em outras, certo afundamento da tensão no equipamento. Este afundamento é uma das consequências da corrente de *inrush*, conforme já citado anteriormente.

Para efeito de comparação com as correntes de *inrush* registradas, a corrente de magnetização em regime permanente acha-se mostrada na Fig. 20.

Na Fig. 21 a Fig.26 são mostradas as formas de onda das correntes de *inrush* (CH1) para diferentes ângulos de gatilho.

Também pode ser visualizada uma amostra do fluxo λ do núcleo magnético (CH2), obtida através da tensão no circuito *RC* do secundário do transformador.

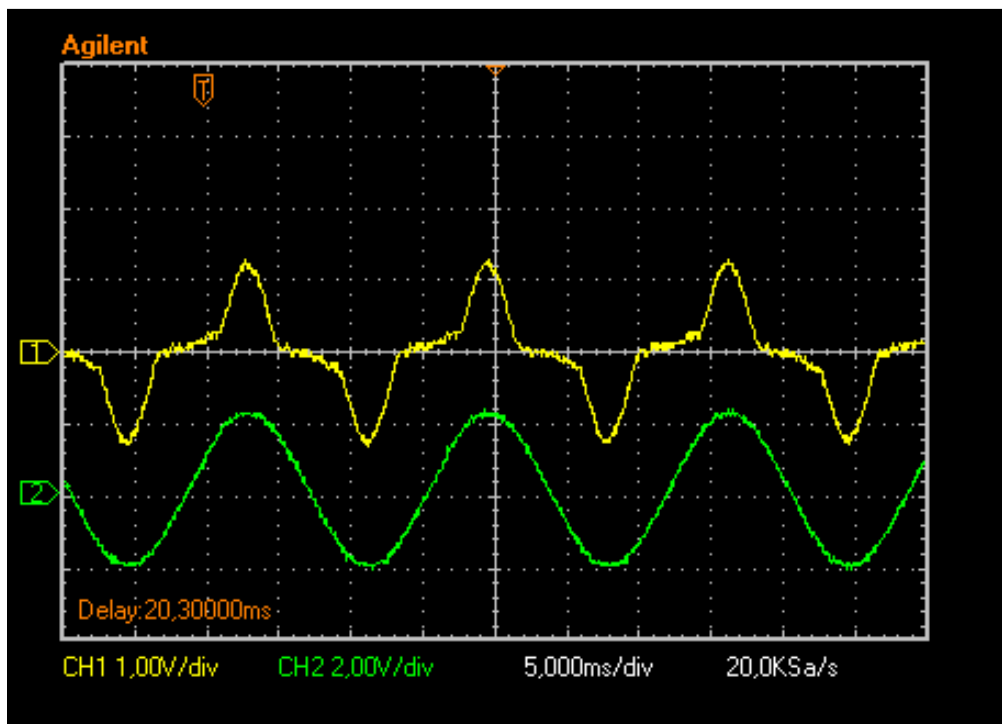


Fig. 20. Corrente de magnetização (CH1) e fluxo (CH2) em regime permanente.

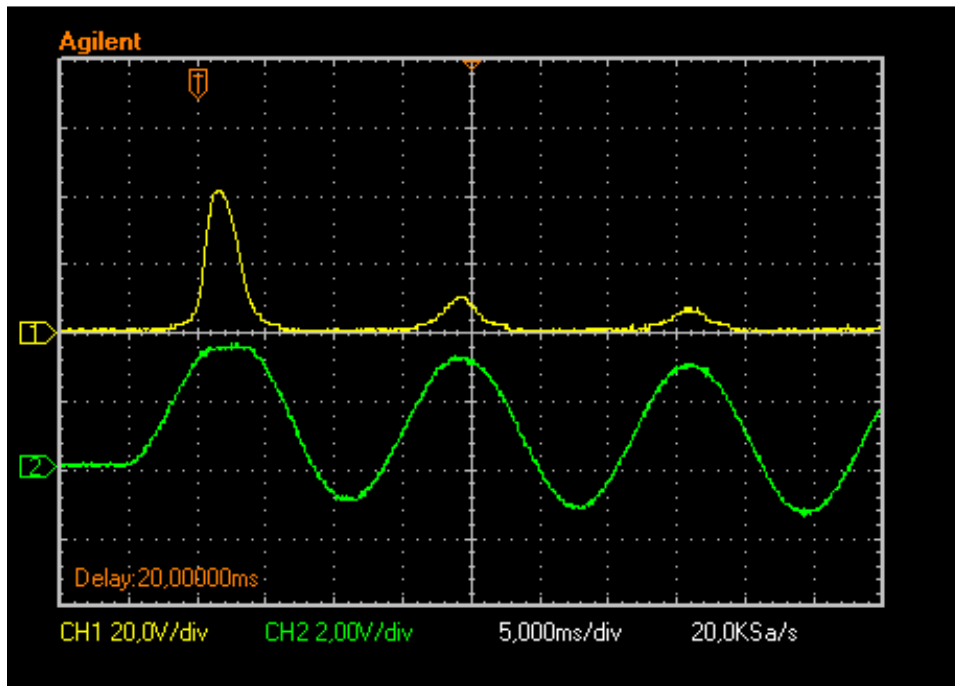


Fig. 21. Corrente de *inrush* (CH1) e fluxo (CH2) para ângulo de chaveamento igual a 0° .

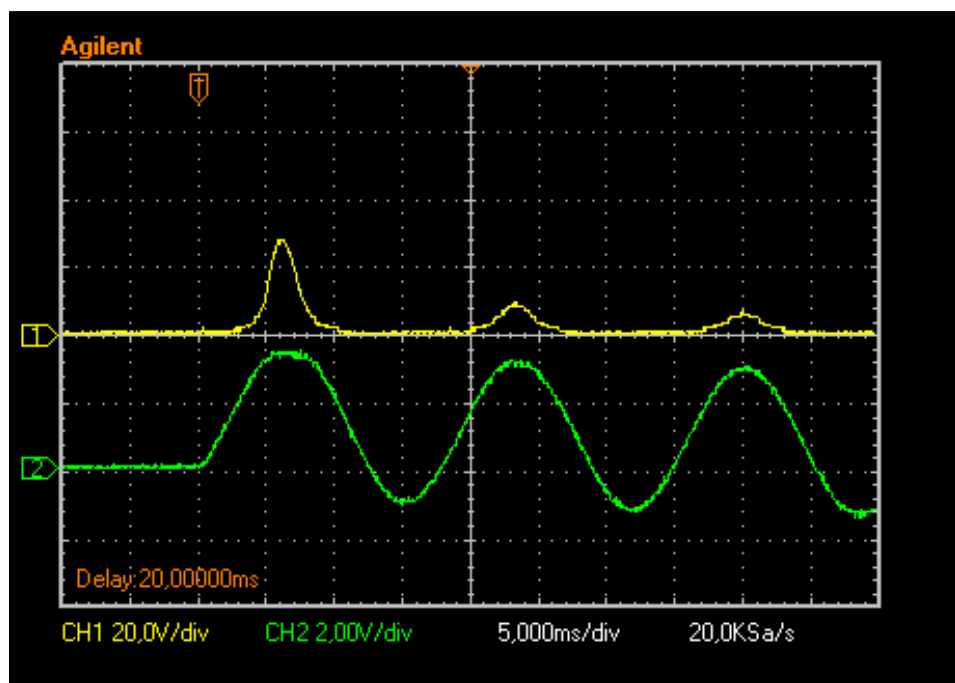


Fig. 22. Corrente de *inrush* (CH1) e fluxo (CH2) para ângulo de chaveamento igual a 30°

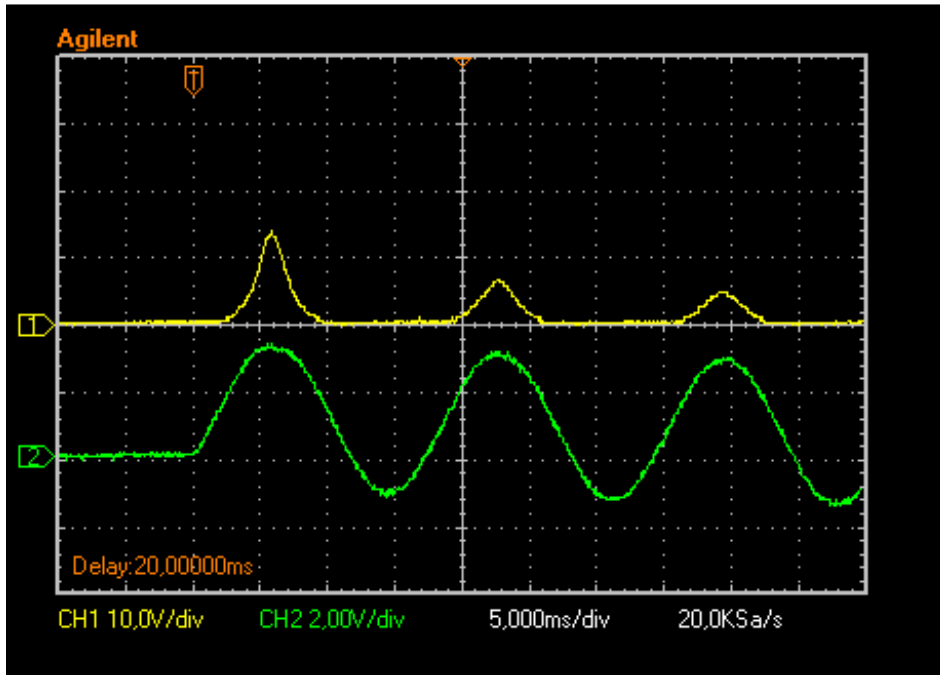


Fig. 23. Corrente de *inrush* (CH1) e fluxo (CH2) para ângulo de chaveamento igual a 45°.

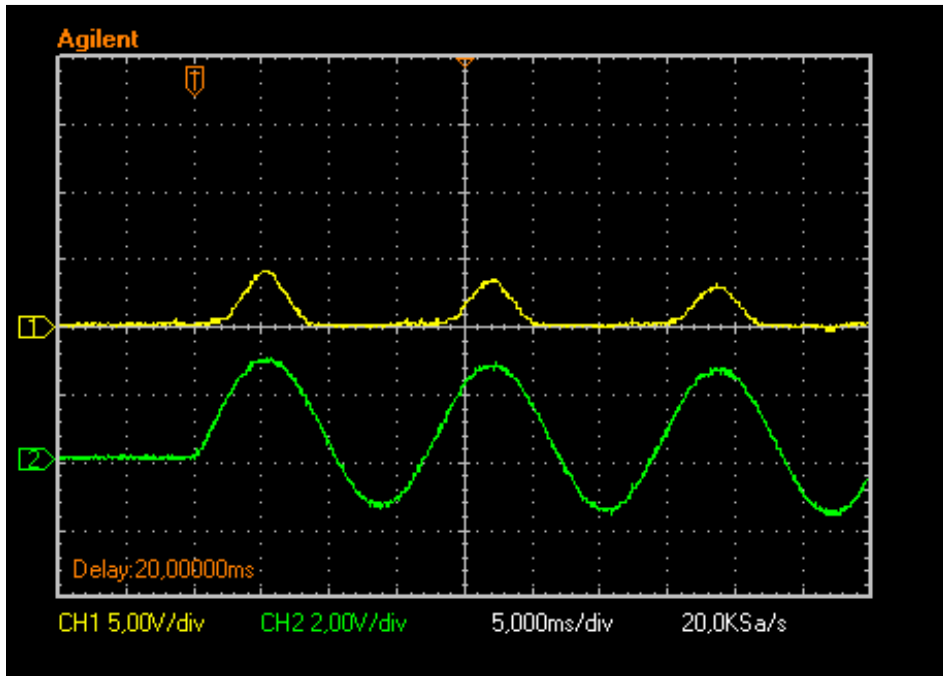


Fig. 24. Corrente de *inrush* (CH1) e fluxo (CH2) para ângulo de chaveamento igual a 60°.

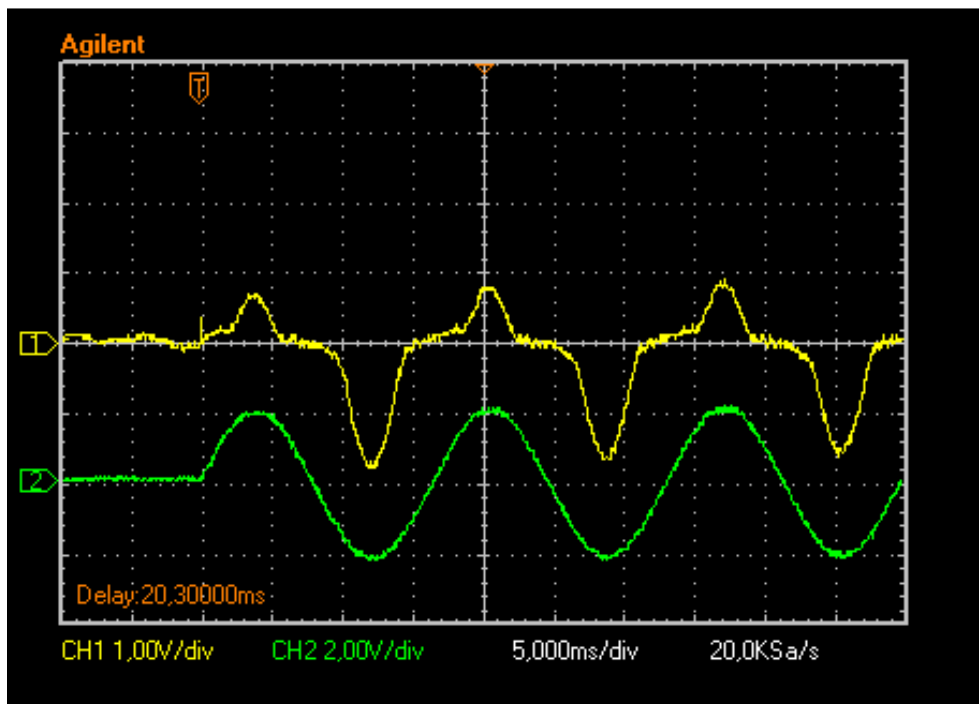


Fig. 25. Corrente de *inrush* (CH1) e fluxo (CH2) para ângulo de chaveamento igual a 90° .

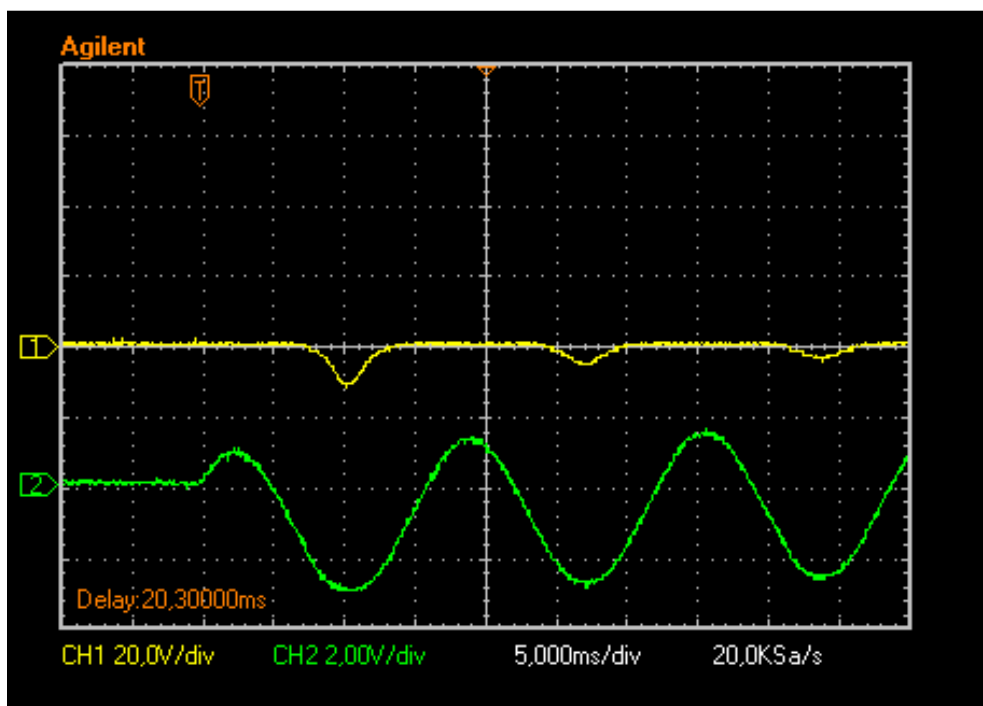


Fig. 26. Corrente de *inrush* (CH1) e fluxo (CH2) para ângulo de chaveamento igual a 120°

Observa-se a diminuição da amplitude da corrente de *inrush* à medida que o ângulo de gatilho aproxima-se de 90° (atentar para a escala utilizada em cada uma das figuras), conforme já era de se esperar. Neste caso ótimo de chaveamento, a corrente transitória em questão é praticamente nula, sendo possível notar certa semelhança entre esta e a corrente de magnetização em regime transitório pela comparação entre a Fig. 20 até a Fig. 25. A mesma comparação pode ser feita para o fluxo magnético em cada uma das figuras citadas.

4. CONCLUSÃO

Foi realizado um aperfeiçoamento de um projeto de chave síncrona baseada no microcontrolador PIC16F877A. Os desenvolvimentos efetuados consistiram em:

- Substituição de *triacs* por relés, conferindo maior grau de verossimilhança em relação aos disjuntores reais, já que o atraso incluído no projeto facilita a utilização da chave (embora algumas modificações possam ser feitas) em sistemas reais.

- Inserção de um módulo de saída que permite efetuar o chaveamento de transformadores trifásicos, minimizando o efeito de *inrush* nas três fases.

- Melhoria no *hardware* do dispositivo desenvolvido, permitindo sua utilização em aplicações de laboratório, as quais exigem maior robustez em face do grau de solicitação mais intenso. Como exemplo, pode-se citar: montagem em placa de circuito impresso integrada, a qual foi projetada e confeccionada em equipamento *CAD/CAM.*, confecção de um teclado apto a solicitações de maior frequência e intensidade.

- Melhoria no *software* empregado no controle da chave, elaborado em linguagem C++.

Em relação a trabalhos futuros, sugere-se o emprego do equipamento desenvolvido no estudo experimental de técnicas de chaveamento em transformadores trifásicos de diferentes formas de ligação de enrolamentos e configurações de núcleos magnéticos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Leite, A. S. M., Abel, *Aperfeiçoamento de Chave Síncrona Baseada em Microcontrolador PIC 16F877*, TCC, DEE / CEEI / UFCG, 2007.
- [2] Guerra, F. C. F., *Corrente de Inrush em Transformadores*, Notas de Aula, DEE / CEEI / UFCG, 2005.
- [3] Carneiro, S. J., Bonsaver, E. *Chave Síncrona Digital de Aplicações Múltiplas*, Mundo Elétrico, abril de 1979.
- [4] Wang, Y., Abdulsaiam, S. G., Xu, W. *Analytical Formula to Estimate the Maximum Inrush Current*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, 2008.
- [5] Ling, P. C. Y., Basak, A. *Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-Phase Transformer*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 24, No. 6, 1988.
- [6] Koltermann, P. A., Pinto, P. O. J., Ortega, J. M. *Uma Modelagem Para a Análise da Corrente Transitória de Magnetização em Transformadores*, Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 1995.

ANEXO

Layout da Placa de Circuito Impresso

